

ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA EL CÁLCULO DE EROSIÓN POR MEDIO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE LA PÉRDIDA DE SUELO (USLE). CASO ESTUDIO TIBASOSA, BOYACÁ.

Multi-Criteria Analysis for the Calculation of Erosion Using the Universal Soil Loss Equation (USLE). Case Study Tibasosa, Boyacá.

Laura Barrera, Juanita Saavedra

Facultad de Ingeniería Civil, Especialización en Ingeniería Hidroambiental, Universidad Santo Tomás (Sede Tunja), lauraj.barreras@usantoto.edu.co, juanita.saavedra@usantoto.edu.co

Resumen Se presenta la forma de estimar la pérdida de suelo en el municipio de Tibasosa, ubicado en el departamento de Boyacá, haciendo uso de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE), mediante el software ArcGIS Pro. El estudio se basa en un enfoque de análisis multicriterio, donde se consideran variables fundamentales como la cantidad de precipitación, la inclinación del terreno, las características del suelo, la cobertura vegetal y las prácticas de uso del suelo. A partir de estos datos, se construyen mapas temáticos que permiten ubicar las zonas más afectadas por erosión, con el fin de proponer estrategias técnicas que favorezcan su conservación. Se busca contribuir a una gestión ambiental más eficiente y sostenible en beneficio de la comunidad y sus recursos naturales.

Palabras clave: Erosión del suelo, USLE, ArcGIS Pro, Análisis multicriterio, SIG, Tibasosa

Abstract The way to estimate land loss in the municipality of Tibasosa, located in the department of Boyacá, using the Universal Land Loss Equation (USLE), using ArcGIS Pro software. The study is based on a multi-criteria analysis approach, which considers fundamental variables such as rainfall quantity, terrain slope, soil characteristics, plant cover and land use practices. On the basis of this data, thematic maps are drawn up to locate the areas most affected by erosion in order to propose technical strategies for their conservation. It seeks to contribute to more efficient and sustainable environmental management for the benefit of the community and its natural resources.

Keywords: Soil erosion, USLE, ArcGIS Pro, multi-criteria analysis, GIS, Tibasosa

I. INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo por erosión constituye una de las problemáticas ambientales más relevantes en entornos rurales como Tibasosa, ubicado en el departamento de Boyacá, Colombia. Este fenómeno, impulsado tanto por causas naturales como por actividades humanas, como la deforestación y prácticas agrícolas inadecuadas, compromete la productividad del terreno, la estabilidad ecológica y la calidad del entorno (FAO et al., 1980). Ante esta situación, resulta indispensable realizar un análisis detallado que permita estimar con precisión la pérdida de suelo y localizar las zonas más vulnerables para orientar acciones correctivas. En este contexto, la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE) desarrollada por

Wischmeier y Smith (1978), se presenta como una herramienta adecuada para modelar la erosión hídrica. Este modelo integra variables como el régimen de lluvias, tipo de suelo, pendiente, vegetación y manejo del terreno, factores que influyen directamente en la pérdida de suelo (Rengifo-Rengifo et al., 2022).

Dentro del modelo USLE, uno de los parámetros fundamentales es el Factor R, el cual refleja la erosividad de la lluvia, es decir, el impacto potencial de la precipitación en la remoción del suelo. Para su estimación se utilizaron los registros pluviométricos procedentes de diversas estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio. Estos valores fueron procesados en un entorno SIG y espacializados mediante el método de interpolación Spline, el cual genera una superficie

continua que representa la distribución espacial de la erosividad (ESRI, 2025; IDEAM, 2025). Esta técnica resulta adecuada especialmente en zonas donde la distribución de estaciones es dispersa, ya que permite suavizar las diferencias entre puntos y obtener una estimación más uniforme y precisa del comportamiento de las lluvias. De esta forma, se obtiene una representación realista de la influencia del régimen hídrico en los procesos de erosión (Pérez et al., 2019).

Otro componente esencial en la estimación de la pérdida de suelo es el Factor K, el cual representa la erodabilidad del suelo, es decir, la susceptibilidad que presenta un tipo de suelo frente a los procesos de erosión hídrica. Para su cálculo, se recurrió a datos edafológicos recolectados en puntos de muestreo dentro del área de estudio, que fueron procesados en un entorno SIG. A partir de estos datos, se aplicó el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting), una técnica que estima valores en ubicaciones no muestreadas ponderando la influencia de puntos cercanos según su distancia (Pacheco et al., 2019). Este método es adecuado cuando los datos puntuales están bien distribuidos, ya que permite generar una superficie continua que representa espacialmente la variabilidad de la erodabilidad del suelo en el territorio, el procedimiento específico aplicado para este factor se describe con mayor detalle en la sección Metodología.

Al combinar estos elementos con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), como la Calculadora Raster que posibilita la generación y ejecución de expresiones de álgebra de mapas dentro de una única herramienta. Al igual que otras funciones de geoprocetamiento, esta herramienta puede incorporarse en ModelBuilder, lo que permite incluir la capacidad del álgebra de mapas en los procesos de trabajo en ArcGIS Pro, también se facilita una representación espacial detallada que permite visualizar, cuantificar y priorizar zonas de riesgo (Esri, 2024). El propósito de este estudio es aplicar un análisis multicriterio en un entorno SIG para estimar la pérdida de suelo en Tibasosa. Se pretende generar mapas temáticos que orienten la planificación territorial y contribuyan a la toma de decisiones ambientales. Esta investigación responde a la necesidad de contar con metodologías que integren tecnología, datos geoespaciales y modelos empíricos para enfrentar los retos de sostenibilidad y conservación del suelo en el ámbito local (Rengifo-Rengifo et al., 2022).

La presente investigación se desarrollará bajo un enfoque cuantitativo, mediante una metodología de análisis multicriterio en un entorno SIG, concretamente utilizando la Calculadora Raster de ArcGIS Pro. A continuación, se detallan los elementos claves del diseño metodológico:

Área de estudio:

Municipio de Tibasosa, Boyacá, Colombia, teniendo en cuenta las zonas con mayor pendiente y menor cobertura vegetal.

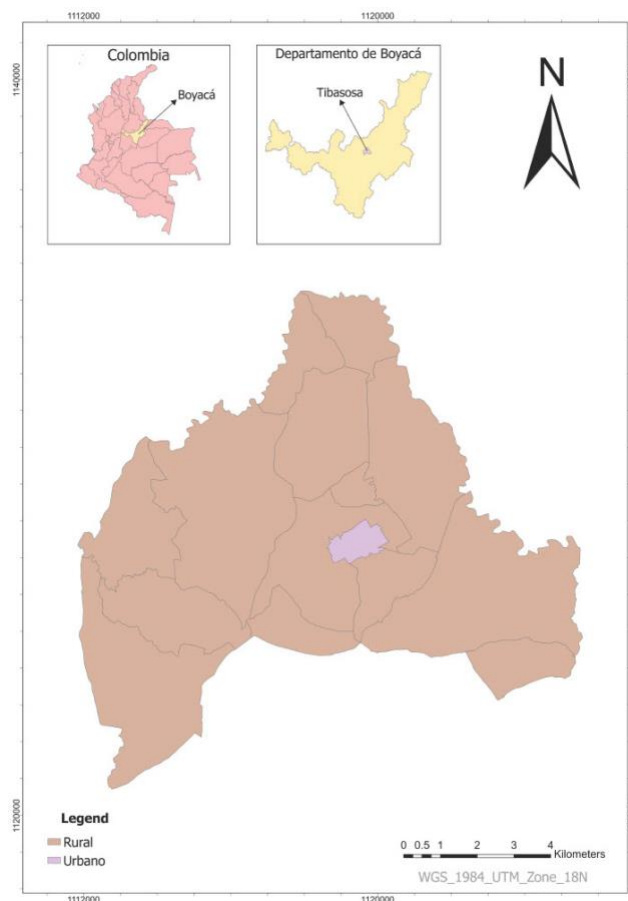


Fig. 1 Ubicación del municipio

Fuente: Autores

Variables del modelo USLE consideradas:

- Factor R: erosividad de la lluvia, calculada a partir de registros climáticos históricos.
- Factor K: erodabilidad del suelo, definido según el tipo y textura de los suelos locales.
- Factor LS: pendiente y longitud de la pendiente, derivada de un modelo de elevación digital (DEM).
- Factor C: cobertura vegetal, obtenida mediante imágenes satelitales clasificadas.
- Factor P: prácticas de conservación, definidas con base en el uso del suelo y técnicas agrícolas reportadas.

II. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología empleada para la estimación de la pérdida de suelo.

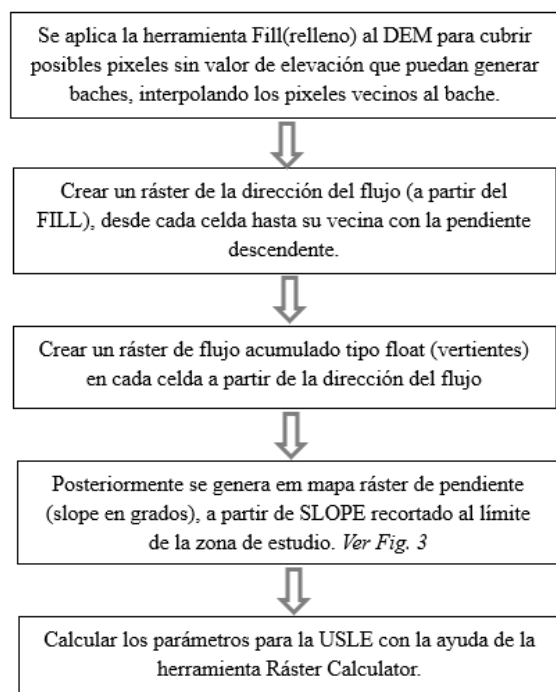


Fig.2 Esquema metodológico
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3 se puede apreciar el mapa de pendiente recortado a la zona de estudio, en este caso el municipio de Tibasosa, el cual permite identificar los perfiles del terreno según su grado de inclinación. (INVÍAS, 2008, p. 130).

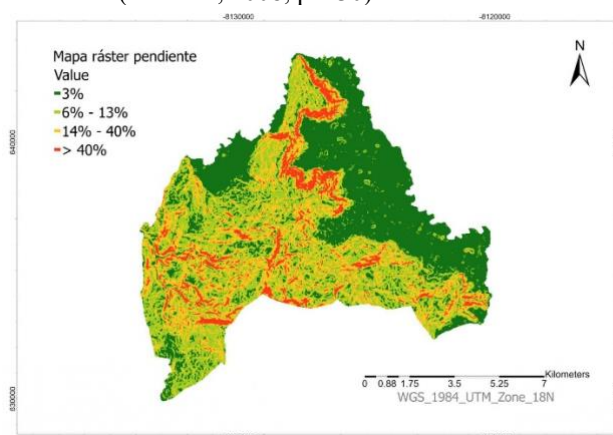


Fig. 3 Mapa ráster pendiente
Fuente: Autores

A continuación, se muestran el cálculo de las expresiones y parámetros para la USLE, mediante la herramienta Ráster Calculator, Ver Tabla 1:

Tabla 1 Expresiones y parámetros

Parámetro	Expresión
Factor F: en función del mapa de pendiente	$(\sin(\text{"slope"} * 0.01745) / 0.0896) / (3 * \text{Power}(\sin(\text{"slope"} * 0.01745), 0.8) + 0.56)$
Factor m: en función del factor F	$\text{"factor_F"} / (1 + \text{"factor_F"})$
Factor L: en función de la acumulación de flujo, el factor m y el tamaño del píxel	$(\text{Power}(\text{"acumulation"} + (19 * 19), (\text{"factor_m"} + 1)) - \text{Power}(\text{"acumulation"}, (\text{"factor_m"} + 1))) / (\text{Power}(19, (\text{"factor_m"} + 2)) * \text{Power}(22.13, \text{"factor_m"}))$
Factor S: en función de la pendiente	$\text{Con}((\tan(\text{"slope"} * 0.01745) < 0.09), (10.8 * \sin(\text{"slope"} * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \sin(\text{"slope"} * 0.01745) - 0.5))$
Factor LS:	$\text{"factor_L"} * \text{"factor_S"}$
Factor R: a partir de las estaciones (con el atributo de precipitación), mediante el método Spline	La evaluación del comportamiento de la precipitación en el sector de interés fue empleada las estaciones presentadas. Ver Tabla 2
Factor K: a partir de los puntos de exploración (con el atributo de erodabilidad del suelo, k), mediante el método IDW	Se realiza un clip con la forma de la cuenca para que cubra el área de estudio. Posteriormente, los valores de erodabilidad (K) hallados fueron clasificados conforme a las texturas, según: Ver Tabla 3
Factor C: cobertura del suelo, para asignar valores de factor C	De acuerdo con el uso de suelo se tiene en cuenta la siguiente clasificación según, Ver Tabla 4 y luego se convierten a ráster los vectores de COBERTURA de suelo en función del factor C

Fuente: Adaptado de Wischmeier & Smith (1978), Pérez et al. (2019), y Rengifo-Rengifo et al. (2022).

En la Tabla 2 se muestran las estaciones pluviométricas del IDEAM con sus respectivas coordenadas, utilizadas para calcular el factor R.

Tabla 2 Estaciones del IDEAM

Código Estación	Nombre Estación	Latitud	Longitud	Categoría
24035340	Aeropuerto A Lleras C Aut	5.67	-72.96	Pluviométrica
24035350	Andalucía	5.90	-73.06	Pluviométrica
24030510	Cerezo	5.69	-73.07	Pluviométrica
24030540	Firavitoba	5.66	-72.97	Pluviométrica
24030940	SENA	5.75	-72.90	Pluviométrica
24030410	Tibasosa	5.74	-73.00	Pluviométrica

Fuente: Autores

En la Tabla 3 se aprecia la clasificación de los valores del factor K (erodabilidad del suelo) según la textura del material, su grado de susceptibilidad a la erosión y la explicación correspondiente.

Tabla 3 Valores de K (erodabilidad), se clasificaron según sus texturas

Textura	K	Grado	Motivo
Finas (alto contenido de arcilla)	0,05 – 0,15	Bajo	Resistencia al desprendimiento
Gruesas (arenosos)	0,15 – 0,20	Bajo	Escaso escurrimiento
Medias (francos)	0,25 – 0,45	Moderado	Moderada susceptibilidad al escurrimiento
Limosas (alto contenido de limo)	0,45 – 0,65	Alto	Susceptibilidad a la erosión (encontramiento y alto escurrimiento)

Fuente: Pérez et al. (2019)

En la tabla 4 se detallan los valores del factor C asignados a cada tipo de cobertura vegetal, utilizados para estimar la pérdida de suelo en función del uso del terreno.

Tabla 4 Valores de cobertura (C)

Tipo de Cubierta	Factor C
Afloramientos rocosos	0,25
Arbustos	0,25
Bosque de galería y/o ripario	0,09
Bosque denso	0,001
Herbazal	0,01
Lagunas, Lagos y ciénagas naturales	0,001
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0,003
Mosaico de pastos con espacios naturales	0,003
Mosaico de pastos y cultivos	0,003
Mosaico de cultivos	0,25
Pastos enmalezados o enrastrados	0,6
Pastos limpios	0,01
Red vial, ferroviarias y terrenos asociados	0,001
Ríos (50 m)	0,001
Tejido urbano continuo	0,001
Tierras desnudas o degradadas	1
Zonas glaciares y nivales	0,25

Fuente: Pacheco et al. (2019)

Nuevamente haciendo uso de la herramienta Ráster Calculator se genera por último el mapa final de pérdida de suelo (Factor A):

$$A=R*K*LS*C \text{ (Ton/Ha/año)}$$

Siendo posible categorizar el mapa en función de los siguientes rangos:

Tabla 5 Clasificación de degradación de suelo

Pérdida de suelos (t/ha/año)	Nivel de degradación
< 10	Ninguna o ligera
10 – 50	Moderada
50 – 100	Acusada
100 – 200	Alta
>200	Muy alta

Fuente: FAO et al. (1980)

III. RESULTADOS

A continuación, se presenta el mapa temático que ilustra el nivel de pérdida de suelo en el municipio de Tibasosa, como resultado del análisis multicriterio aplicado en un entorno SIG mediante la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE). Este mapa sintetiza espacialmente la influencia de factores como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la pendiente del terreno, el uso y cobertura del suelo, permitiendo identificar con claridad las zonas más afectadas por los procesos de degradación. La información geoespacial obtenida facilita la visualización y priorización de áreas críticas, con el fin de orientar estrategias de conservación y uso sostenible del suelo.

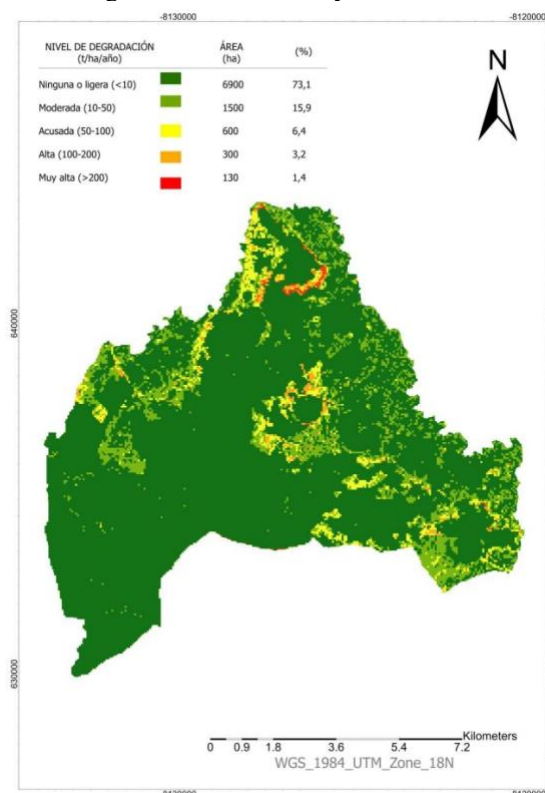


Fig. 4 Mapa de pérdida de suelo en Tibasosa, Factor A
Fuente: Autores

Según la tabla de clasificación por nivel de degradación se observa que la mayor parte del territorio de Tibasosa, aproximadamente el 74 %, presenta un nivel de degradación nulo o ligero, lo cual refleja buenas condiciones de cobertura vegetal y manejo del suelo. No obstante, cerca del 15 % del área se encuentra en un estado moderado de erosión, mientras que el 11 % restante presenta niveles acusados, altos o muy altos de degradación, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas y uso agrícola intensivo. Estos resultados permiten identificar sectores prioritarios para la implementación de prácticas de conservación, contribuyendo así a la protección del recurso edáfico y al desarrollo sostenible del municipio.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- La mayor parte del municipio de Tibasosa presenta tasas de erosión menores a 10 toneladas por hectárea por año, como lo indica la predominancia del color verde oscuro en el mapa. Esto sugiere condiciones favorables de estabilidad del suelo, probablemente asociadas a pendientes suaves, cobertura vegetal adecuada y/o la implementación de prácticas de manejo y conservación del suelo eficaces.
- Se identifican zonas dispersas de erosión moderada, representadas por los colores verde claro y amarillo, correspondientes a pérdidas de entre 10 y 100 toneladas por hectárea por año. Estas áreas se localizan principalmente en zonas intermedias y en algunos bordes del municipio, donde posiblemente la cobertura vegetal ha disminuido o las pendientes comienzan a ser más pronunciadas, aumentando la vulnerabilidad a la erosión.
- Los sectores con colores naranja y rojo, que representan pérdidas de suelo entre 100 y más de 200 toneladas por hectárea por año, señalan focos críticos de erosión. Estos se concentran principalmente en el norte, centro y sectores del oriente y suroriente de Tibasosa. Estas zonas críticas podrían estar asociadas a pendientes fuertes, suelos más susceptibles a la degradación o prácticas agrícolas intensivas sin medidas de conservación adecuadas, por lo que requieren atención prioritaria.

El mapa muestra que Tibasosa presenta una tendencia general hacia una baja susceptibilidad a la erosión del suelo, lo cual es positivo para la estabilidad ambiental del municipio. Sin embargo, la presencia de focos de erosión severa exige la implementación de estrategias de manejo y conservación del suelo, como la reforestación, el establecimiento de barreras vivas y

prácticas agrícolas sostenibles, para mitigar el riesgo de degradación en las zonas más vulnerables.

V. CONCLUSIONES

- ✓ La aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) en el municipio de Tibasosa, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS Pro), permitió estimar de manera precisa la distribución espacial de la erosión hídrica en la región. Los resultados mostraron que la mayor parte del territorio presenta tasas de erosión bajas, inferiores a 10 toneladas por hectárea por año, lo cual refleja condiciones favorables de estabilidad del suelo en amplias zonas del municipio. La generación de mapas temáticos a partir del análisis de datos de erosión permite identificar con precisión las zonas más vulnerables, facilitando la toma de decisiones técnicas orientadas a su conservación. Esta herramienta se convierte en un soporte clave para la planificación ambiental, promoviendo una gestión sostenible del territorio que beneficie tanto a las comunidades locales como a los ecosistemas involucrados.
- ✓ Sin embargo, el análisis espacial evidenció sectores críticos de alta erosión, principalmente localizados en las zonas norte, centro y suroriente de Tibasosa, donde las pérdidas de suelo superan las 100 toneladas por hectárea por año. Estas áreas coinciden con terrenos de mayor pendiente, menor cobertura vegetal y posiblemente un manejo inadecuado del suelo, aspectos que incrementan la susceptibilidad a la degradación.
- ✓ La metodología empleada, basada en un enfoque multicriterio y en la integración de variables climáticas, topográficas, edafológicas y de cobertura vegetal, permitió identificar con detalle los factores que inciden en los niveles de erosión. La combinación de estos factores en un entorno SIG facilitó la generación de cartografía temática que cuantifica la pérdida de suelo, se concluye que la implementación de estrategias técnicas de conservación de suelos, resulta fundamental para mitigar la erosión en las zonas más vulnerables. Este tipo de estudios destaca la importancia de utilizar tecnologías geoespaciales en la gestión ambiental, contribuyendo a una planificación territorial más informada y a la preservación de los recursos naturales en beneficio de la comunidad.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Esri. (2025). *ArcGIS Pro* [Software de sistema de información geográfica]. Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com>

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2025). *Datos de estaciones*.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. (2008). *Manual de diseño geométrico de carreteras* [PDF]. Bogotá, D.C.: Ministerio de Transporte. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/proyectos-de-norma/11313-manual-de-diseno-geometrico-de-carreteras-2008/file>
- Pacheco, A., Rodríguez, M., & Torres, L. (2019). *Estimación de la pérdida de suelo mediante la ecuación USLE en zonas rurales con diferentes coberturas vegetales*. Revista Colombiana de Ciencias Ambientales, 41(1), 45-60.
- FAO, PNUMA, & UNESCO. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de tierras*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Pérez, R., Martínez, J., & Gómez, L. (2019). *Evaluación de la erosión hídrica mediante la ecuación USLE en cuencas hidrográficas andinas*. Revista de Ciencias Ambientales, 53(2), 115-130.
- RENGIFO-RENGIFO, I. Y., MUÑOZ-GOMEZ, F. A., & TORO-TROCHEZ, O. A. (2022). Modelo USLE para estimar la erosión hídrica en siete municipios de la zona andina colombiana. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 20(2), 29-44.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (Agriculture Handbook No. 537). Washington, DC: U.S. Department of Agriculture.